

Tixier P.
PRAM / Cirad,

Marie P.
PRAM / Cemagref,

Houdart M.
PRAM / Cirad.

Développer de nouveaux outils pour les problématiques agro-environnementales

Un des principaux enjeux de la recherche agronomique actuelle est de permettre aux exploitations agricoles d'atteindre les nouveaux objectifs environnementaux assignés par les réglementations nationale et européenne. Chercheurs et ingénieurs réfléchissent donc à de nouvelles pratiques agricoles qui assurent ces objectifs par une réduction significative des impacts polluants (système « zéro pesticide » par exemple). Néanmoins, cette aptitude des systèmes de culture à répondre à la contrainte environnementale fixée ne suffit pas. Pour que ces systèmes de culture soient performants, il faut également évaluer leur capacité d'adaptation et d'intégration aux pratiques et stratégies de l'exploitant.

Il s'agit donc, pour les acteurs de la recherche, de s'interroger à la fois sur

1- les performances environnementales des solutions proposées (en terme de réduction des impacts négatifs)

2- les critères de choix des exploitants agricoles (pour la mise en œuvre concrète de ces solutions).

En conséquence, deux thématiques distinctes mais corrélées sont étudiées (Figure 1) :

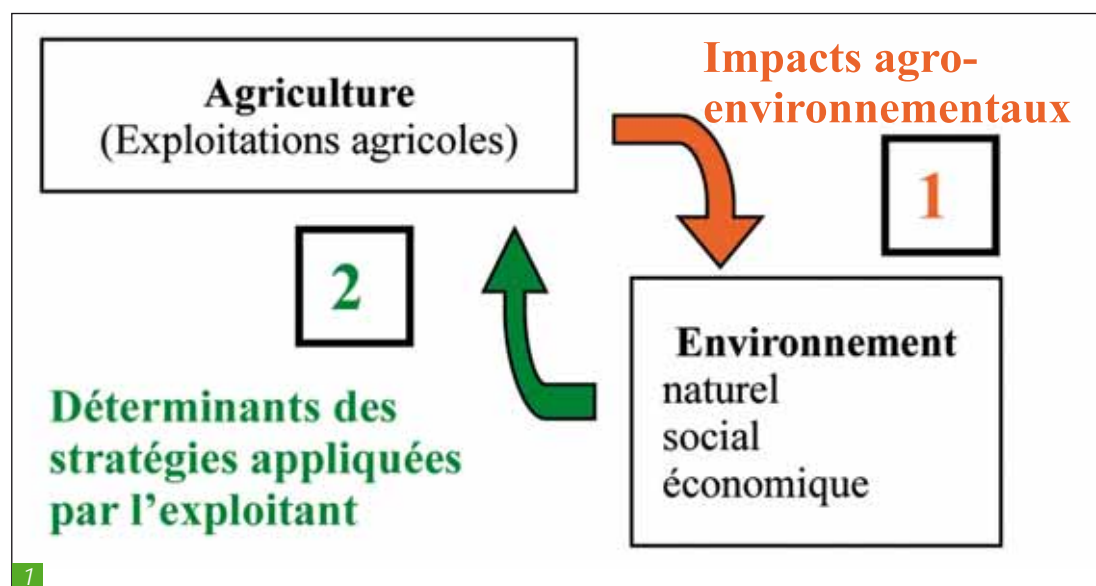
- 1 • comprendre l'ensemble des processus biologiques et physico-chimiques qui régissent la nature et l'intensité des impacts de l'agriculture sur l'environnement naturel, afin d'imaginer en retour des solutions techniques performantes,

- 2 • identifier les facteurs qui déterminent l'appropriation de nouveaux systèmes de culture ou de nouvelles pratiques par les exploitants. Ces facteurs ne sont pas forcément intrinsèques à l'exploitation, mais souvent relatifs à son environnement général, qu'il soit naturel (pression parasitaire), social (niveau de formation des professionnels) ou encore économique (dynamique des marchés agricoles).

Nous proposons d'aborder ces problématiques par trois contributions différentes, qui illustrent des travaux de recherche effectués au PRAM. Dans les deux premiers articles (P. Tixier et P. Marie), nous décrivons les méthodes utilisées pour évaluer les impacts agro-environnementaux, à l'échelle d'une parcelle voire d'une exploitation agricole pour le premier, à l'échelle d'un territoire côtier pour le second. Dans le troisième article (M. Houdart), nous nous intéressons en retour à la nature des facteurs internes et externes au monde agricole qui influencent les décisions des exploitants

Ce faisant, nous souhaitons insister sur la complexité d'une telle démarche, qui nécessite la prise en compte d'échelles d'étude spatiales et temporelles différentes, ainsi que l'agrégation de données aussi diverses qu'essentiels. Nous espérons ainsi clarifier auprès du lecteur le terme émergent d'agro-environnement.

Figure 1 :
la double
problématique de
l'agro-environnement.



Tixier P.
PRAM / Cirad

• *Évaluation assistée par modèle des risques environnementaux à l'échelle de la parcelle : exemple des systèmes de culture à base de bananiers*

Aux Antilles françaises les systèmes de culture à base de bananiers résultent de l'interaction de différents facteurs : historiques, naturels, techniques, commerciaux, réglementaires et sociaux. Ces systèmes de cultures sont soumis à des contraintes fortes d'ordre technique, commercial et sociétal.

Dans ce contexte, des changements importants dans la manière de produire sont devenus nécessaires, notamment concernant l'emploi des produits phytosanitaires qui devra forcément être réduit.

Il y a actuellement, associés à cette production, des problèmes de durabilité agronomique (dûs au développement de parasites et à la détérioration des propriétés physiques et chimiques du sol) et de graves dégradations des milieux environnants avec notamment des problèmes de pollution de la ressource en eau par les produits phytosanitaires. La diversité des situations culturelles, aussi bien au niveau des pratiques que de l'hétérogénéité des sols et de la variabilité climatique, ne permet pas de fournir un constat global.

Face à des risques environnementaux importants déjà avérés, il est indispensable d'élaborer de nouvelles stratégies visant à les limiter. La mise en œuvre de rotations culturelles avec d'autres cultures comme la canne à sucre ou l'ananas, la mise en place de jachères, de travaux de préparation du sol adaptés, d'une gestion raisonnée du cycle de la culture et des produits phytosanitaires constituent quelques éléments clés de ces nouvelles stratégies. Il est néanmoins nécessaire de disposer de méthodes et d'outils pour évaluer les systèmes de culture existants ou innovants.

Une approche intégrée des agrosystèmes est fondamentale et les modèles de simulation représentent, de par leur nature prédictive, des outils privilégiés pour cela.

L'évaluation de la durabilité agronomique et environnementale des systèmes de culture constitue une composante fondamentale de la démarche de conception de systèmes de culture

performants et respectueux de l'environnement. Durant la dernière décennie, les méthodes d'évaluation des risques et des impacts environnementaux liés aux activités agricoles ont connu un intérêt croissant (Girardin et al., 2000). Bien que ces méthodes aient des objectifs souvent différents, elles sont caractérisées par une approche écologique commune des processus et par une évaluation des risques environnementaux réalisée à l'échelle de la parcelle. Il est possible de définir un grand nombre d'impacts potentiels des agrosystèmes sur l'environnement, notamment sur les ressources en eaux de surface et souterraine, sur le sol ou sur les biocénoses des écosystèmes naturels.

L'évaluation de l'impact environnemental des systèmes de culture doit prendre en compte non seulement la diversité des facteurs qui entrent en jeu (climat, pédologie, pratiques, etc), mais également les interactions entre ces facteurs, relations qui sont variables au cours du temps.

Rendre compte de l'ensemble des mécanismes nécessite donc des formalismes mathématiques puissants et des méthodologies d'intégration et de hiérarchisation adaptées. Ainsi est-il primordial de disposer d'outils performants qui puissent intégrer la complexité des informations nécessaires. Le recours à la modélisation est de plus en plus fréquent, notamment avec des modèles de simulation. Grâce à leur capacité prédictive, ces derniers permettent de comparer les performances environnementales de différents systèmes de culture, existants ou innovants, dans les conditions pédoclimatiques et parasitaires données, et sur des pas de temps modulables.

La figure 1 présente la structure générale du cadre de modélisation qui a été développé pour les systèmes de culture bananiers. Le modèle SIMBA (Tixier, 2004) modélise les différents compartiments biologiques et physiques de l'agrosystème *via* des modules de simulation en interaction.

Les modules biophysiques simulent le fonctionnement de l'agrosystème et des indicateurs caractérisent les risques agro-environnementaux associés aux systèmes simulés.



Le modèle SIMBA, en fournissant des sorties agronomiques, environnementales et économiques (marge brute), permet l'évaluation multicritère de systèmes de culture simulés selon plusieurs points de vue.

UN MODÈLE DE SIMULATION DU FONCTIONNEMENT BIOPHYSIQUE DE L'AGROSYSTÈME

L'évaluation et la conception de systèmes de culture innovants et durables nécessitent l'utilisation d'outils de modélisations spécifiques qui rendent compte des caractéristiques particulières du système. Les modules biophysiques de SIMBA sont adaptés au contexte des systèmes de culture à base de bananiers aux Antilles. La simulation à l'échelle de la parcelle de ces processus est centrée autour de la prise en compte de l'évolution de la structure du peuplement de bananiers au cours des cycles de culture. Ce point clé conditionne l'ensemble de la dynamique du système et notamment la composante parasitaire qui influe sur la pérennité de la bananeraie et qui conduit à l'emploi des produits phytosanitaires. Le parasitisme des nématodes phytoparasites est simulé en interaction avec la croissance et la structure du peuplement de bananiers, l'état du sol et l'emploi de nématicides. SIMBA modélise également la croissance des bananiers et leur productivité, la structure du sol, la couverture du sol et le bilan hydrique. Les pratiques culturales sont prises en compte à travers des règles de décision. Il est ainsi possible d'évaluer des scénarii de système de culture existants ou innovants.

DES INDICATEURS D'ÉVALUATION DES RISQUES ENVIRONNEMENTAUX

En complément des modules de simulation biophysique de SIMBA, des indicateurs environnementaux permettent d'évaluer les risques associés aux systèmes simulés.

Un indicateur est une variable mesurée ou calculée qui traduit l'intensité d'un phénomène ou une caractéristique d'état du système. Il existe différents types d'indicateurs, les plus élémentaires sont de simples mesures et les plus complexes comprennent l'intégration de plusieurs variables. Pour construire un indicateur intégré, la première étape consiste à définir un jeu de variables représentatives du phénomène devant être évalué. Ces variables peuvent être mesurées, estimées ou simulées. L'agrégation

des variables peut-être réalisée selon différentes méthodes (Van der Werf et Petit, 2002) ; cela peut être de simples moyennes arithmétiques ou des algorithmes faisant appel à des systèmes experts ou à l'intelligence artificielle.

Il est possible de définir deux grandes catégories d'indicateurs liés à l'agro-environnement : indicateurs d'impact et indicateurs de risque. Ces différentes catégories d'indicateurs environnementaux sont utilisées aussi bien pour le pilotage des systèmes que pour leur labellisation ou encore comme outils d'analyse des politiques.

Les indicateurs d'évaluation des risques environnementaux permettent :

- d'évaluer les phénomènes non modélisables,
- de systématiser la connaissance experte

Les risques de pollution des eaux par les produits phytosanitaires et les risques d'érosion sont souvent innérants aux systèmes de culture bananiers. Deux indicateurs ont été développés en vue d'évaluer ces risques, mobilisant des méthodologies similaires à la méthode INDIGO développée par l'INRA Colmar (équipe "Agriculture durable" UMR Nancy-Colmar). La méthode INDIGO présente l'avantage de prendre en compte la connaissance des experts et permet l'agrégation de nombreuses variables.

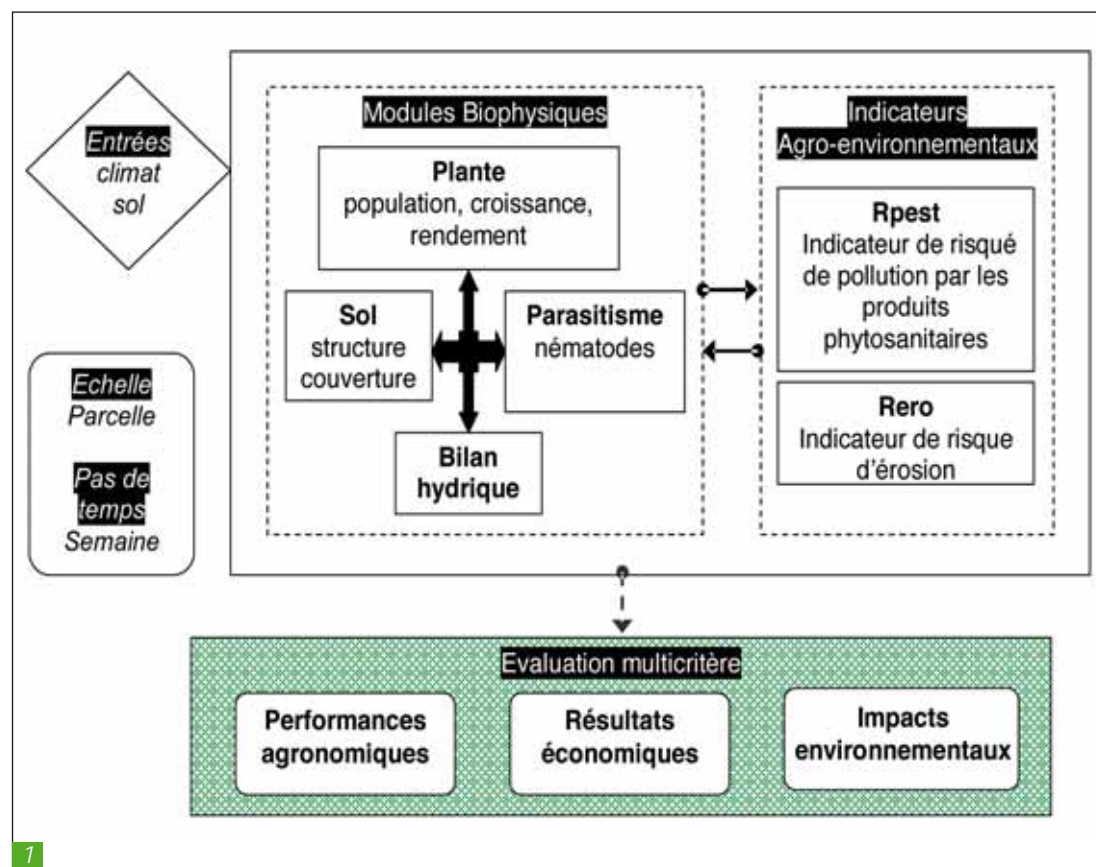
La méthode d'agrégation est basée sur un système expert et utilise la logique floue (méthode SELF). Les indicateurs développés dans SIMBA, prennent en compte les spécificités du contexte physique des Antilles et évaluent le risque de pollution des eaux par les produits phytosanitaires et le risque d'érosion.

Rpest un indicateur de risque de pollution des eaux par les produits phytosanitaires

Depuis de nombreuses années le problème de l'exposition de l'environnement aux produits phytosanitaires est posé au centre de la problématique du développement de systèmes de culture plus durables. Un indicateur appelé Rpest a été construit, il permet l'évaluation du risque de pollution des eaux de surface et des eaux souterraines par les produits phytosanitaires.

Cet indicateur, couplé avec le modèle SIMBA, utilise des sorties biophysiques de celui-ci. Rpest évalue les risques de pollution des eaux de surface ou souterraines de manière séparée ou

Figure 1 :
structure générale
du modèle SIMBA
et lien avec les
indicateurs de risques
environnementaux
Rpest et Rero.



de manière globalisée. La spécificité de cet indicateur est qu'il est calculé au pas de temps hebdomadaire. Il permet ainsi une évaluation dynamique du risque de pollution au cours du temps et donc d'identifier les périodes à risques.

Une note moyenne ou une répartition des notes par classe sur l'ensemble de la période évaluée est également calculée.

Rero un Indicateur d'évaluation du risque d'érosion

Le risque d'érosion est un phénomène complexe qui résulte de l'interaction entre les caractéristiques locales d'état du milieu et le climat auquel ce milieu est soumis. Sur les andosols (sols volcaniques), le ruissellement est généré par une saturation progressive du profil lorsque la pluviométrie excède la capacité d'infiltration des horizons les moins perméables et non à cause d'un colmatage de la porosité superficielle par battance.

L'érosion sur ces sols est principalement due au déplacement sur des courtes distances de particules de sol agrégées. Le travail du sol, la mécanisation ainsi que les cycles d'humectation et de dessiccation permettent d'expliquer la

génération d'agrégats susceptibles de se déplacer. La modélisation du phénomène d'érosion dans de tels systèmes n'a pas donné de résultats très satisfaisants.

Comme Rpest, Rero est un indicateur calculé soit au pas de temps hebdomadaire, afin d'identifier précisément les périodes de risques, soit de manière intégrée sur l'ensemble de la période évaluée (moyenne des notes ou répartition des notes par classe).

EXEMPLES D'ÉVALUATIONS AGRO-ENVIRONNEMENTALES

Cet outil fournit un tableau de bord d'évaluation des performances agronomiques et environnementales des systèmes de culture simulés. La figure 2 présente un exemple d'évaluation multicritères de deux systèmes de culture par le modèle SIMBA. Les systèmes simulés sont un système intensif classique basé sur une monoculture utilisant une lutte chimique intensive et un système plus extensif basé sur des rotations culturales et l'utilisation modérée des intrants chimiques. Cette approche permet de comparer des systèmes de culture différents dans des conditions de sol et de climat iden-



Figure 2 :
tableau de bord
agro-environnemental
simplifié de SIMBA
pour deux systèmes
de culture à base de
bananiers.

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Girardin, P., Bockstaller, C., Van der Werf, H., 2000.

*Assessment of potential impact of agricultural practices on the environment: the AGRO*ECO method. Environmental Impact Assessment Review. 20, 227-239.*

Tixier, P., 2004.
Conception assistée par modèle de systèmes de cultures durables, application aux systèmes bananiers de Guadeloupe. Thèse de l'Ecole Nationale Supérieure Agronomique de Montpellier. 233p.

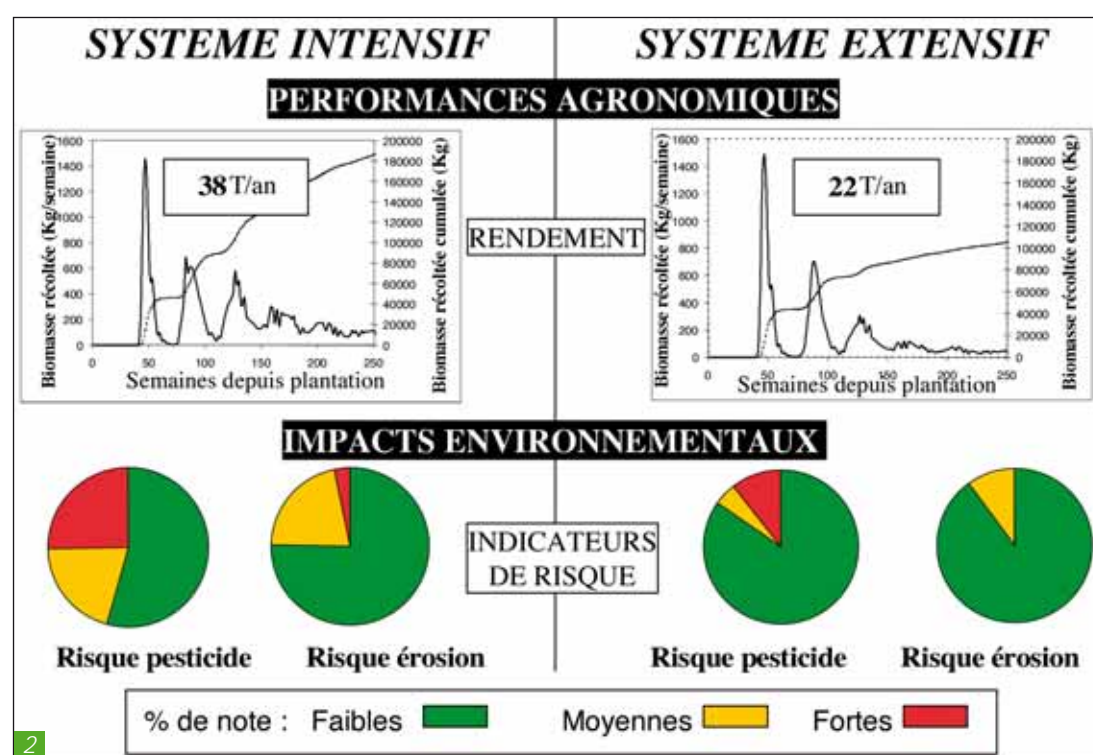
Van der Werf, H.M.G., Petit, J., 2002. *Evaluation of the environmental impact of agriculture at the farm level : a comparison and analysis of 12 indicators-based methods. Agric. Ecosyst. Environ. 93, 131-145.*

tiques. C'est donc un outil puissant pour comparer des systèmes, pour s'abstraire des variations du milieu réel et pour orienter les recherches et les expérimentations devant être menées.

Au-delà de cette utilisation comme outil d'évaluation, SIMBA permet de rechercher des combinaisons optimales de pratiques culturales dans un contexte et pour un objectif donné. L'utilisation de SIMBA a ainsi déjà permis de définir certaines options stratégiques qui devront être testées en conditions réelles.

que les modèles peuvent fournir des variables de description du système simulé à des pas de temps beaucoup plus fins que des mesures biophysiques au champ le permettraient. Ces variables peuvent servir à l'évaluation des risques environnementaux au même pas de temps.

L'échelle de la parcelle est une échelle pertinente pour évaluer les systèmes de culture, notamment les interactions entre système décisionnel de l'agriculteur et le milieu physique.



CONCLUSION

L'approche double de modélisation et d'évaluation par indicateur que nous avons choisie ouvre des perspectives intéressantes ; elle permet :

- de souligner l'interrelation qui peut exister entre indicateurs,
- de prendre en compte le rendement,
- d'avoir une capacité prévisionnelle (utile dans une démarche de conception de systèmes durables),
- d'aider à l'identification des variables critiques,
- de constituer un outil d'intégration des connaissances, et
- de donner à l'évaluation un aspect dynamique.

L'idée maîtresse de l'évaluation dynamique est

De plus, la compréhension des mécanismes impliqués dans les atteintes est un pré-requis pour pouvoir traiter des échelles plus larges telles que l'exploitation agricole, le bassin versant (cf. article de P. Marie) ou le territoire (cf. article de M. Houdart).

Marie P.
PRAM / Cemagref.

• *Evaluer les risques agro-environnementaux à l'échelle de territoires : Diagnostic de l'érosion hydrique des sols agricoles sur le bassin versant de la baie du Robert*

Les méthodologies d'évaluation des impacts agricoles sur l'environnement sont dépendantes du type d'impact que l'on étudie. En outre, la délimitation des zones considérées comme dégradées par une pollution d'origine agricole ou anthropique, et donc le choix de l'échelle d'étude, influencent les méthodes et outils utilisés pour la mise en place du diagnostic.

L'article précédent présente l'évaluation des risques agro-environnementaux à l'échelle d'une parcelle agricole, en l'occurrence une plantation de bananes. On constate qu'à cette échelle qui permet l'obtention de résultats précis, l'objectif est d'identifier les systèmes de culture performants, qui pourront être adoptés par la profession. Or, la performance d'un système de culture résulte d'un compromis délicat à estimer : rendement agronomique optimal, coûts de production réduits, qualités idéales des productions, impacts négatifs sur l'environnement minimisés ; le recours à la modélisation devient donc incontournable.

Néanmoins, la pertinence des modèles est fortement liée au choix et à la précision des variables d'entrée. A l'échelle parcellaire, les données d'entrée peuvent être fournies en nombre suffisant. Mais qu'advient-il si l'impact environnemental est étudié sur des territoires beaucoup plus vastes ?

Les politiques agricoles et environnementales actuelles se raisonnent en effet de plus en plus à l'échelle de « territoires ». Or, un territoire est défini par ses acteurs (types d'acteurs, interactions entre ces derniers) et la nature de leurs enjeux communs. Dans le cas d'une pollution de rivière, le territoire dit « à enjeu » correspondra donc à l'aire géographique influençant cette pollution, c'est-à-dire le bassin versant.

La présente contribution a pour objectif de présenter les étapes de construction d'outils de diagnostic à l'échelle d'un territoire à enjeu environnemental, en prenant pour exemple le diagnostic réalisé par le Pôle de Recherche Agro-environnemental de la Martinique (PRAM) et ses partenaires sur l'envasement de la baie du Robert.

L'ENVASEMENT DE LA BAIE DU ROBERT EST LIÉ À L'ÉROSION HYDRIQUE DES SOLS DU BASSIN VERSANT

Présentation de la zone d'étude

La baie de la commune du Robert, située sur la façade atlantique de la Martinique, constitue un plan d'eau semi-fermé de 6,5 km de long et 3 km de large. Elle est parsemée d'herbiers, de mangroves et de petits récifs. Cette diversité de biotopes et d'écosystèmes lui confère ainsi un rôle de nourricerie pour de nombreuses espèces halieutiques telles que la langouste royale (*Panulirus argus*), l'oursin (*Tripneustes ventricosus*) et des espèces de poissons de récifs.

Depuis une dizaine d'années, plusieurs études ponctuelles ont montré que ces écosystèmes présentaient des signes de dégradation liés à un phénomène combiné d'eutrophisation et d'envasement. L'agriculture, le développement urbain et les rejets d'eaux usées sont identifiés comme les causes principales, même si d'autres pressions marines sont susceptibles de l'aggraver : la surpêche, la fréquentation touristique des îlets ou encore l'aquaculture.

Cette baie est ceinturée par un bassin versant de 23 km² sur lequel on trouve les principaux types d'occupation des sols : de l'agriculture (élevage, canne à sucre et banane), un habitat concentré au niveau du bourg (14 % des logements) mais essentiellement diffus sur les mornes du bassin, et un pôle d'activités industrielles, artisanales et portuaires en bordure littorale. En sortie de baie, le renouvellement des eaux lié aux effets conjugués des marées et des alizés est limité par la faible largeur de la passe. Ces caractéristiques en font donc un site propice à l'étude des impacts anthropiques sur les ressources vivantes du milieu marin côtier.

L'envasement de la baie : un impact marin lié aux activités terrestres

L'envasement des baies abritées est un phénomène naturel lié aux apports de particules solides issues de l'érosion hydrique des bassins versants et à un faible hydrodynamisme qui



permet la sédimentation. Son accélération dans la baie du Robert au cours de cette dernière décennie est évidente et s'explique par des activités anthropiques croissantes. Les conséquences sont que le fond de la baie s'envase et que la turbidité des eaux augmente. Cela se traduit par une réduction considérable des espaces colonisés par les herbiers de phanérogames.

Afin de limiter les impacts de l'érosion des sols sur le milieu marin récepteur, le PRAM s'est associé à l'Ifremer, à l'Université des Antilles et de la Guyane et à la commune du Robert pour mettre en place un diagnostic global. L'objectif est d'analyser à l'échelle du territoire (ici le bassin versant de la baie) les principaux processus qui déterminent la perte en terre des sols, et d'identifier les zones les plus vulnérables à l'érosion.

LA CONSTRUCTION D'UN INDICATEUR DE SENSIBILITÉ DES SOLS À L'ÉROSION

Le diagnostic idéal serait une évaluation quantitative fine des émissions de particules solides en chaque point du bassin versant. Or, à l'échelle d'un territoire de ce type, on se trouve en présence d'une forte hétérogénéité naturelle et anthropique qui rend utopique cette proposition. La superficie du territoire concerné, ses variabilités topographique et pédologique et la diversité des activités et des usages du sol rendent complexe la caractérisation des processus en jeu sur la totalité de la zone considérée.

Dans notre exemple, les ingénieurs du PRAM cherchent donc à construire une représentation du bassin, simplifiée mais cohérente, qui permette d'identifier sur l'ensemble de ce territoire les zones les plus sensibles à l'érosion (et potentiellement les plus productives en sédiments) qui mériteraient des analyses quantitatives plus précises. Ce principe de modélisation, qui découpe le bassin versant en unités géographiques homogènes vis-à-vis d'un enjeu donné (ici la perte en terre) se base sur la définition d'un indicateur.

La première étape consiste à référencer les principaux facteurs explicatifs de l'érosion des sols sur le bassin versant. Quatre variables sont identifiées :

- l'occupation des sols : c'est une variable fondamentale puisqu'elle peut exprimer le degré de protection des sols contre les phénomènes érosifs. Pour

une zone considérée, l'occupation se traduit notamment par le pourcentage de couverture du sol par la végétation ou liée à des actions anthropiques (urbanisation, pratiques agricoles, etc.) ;

- la topographie du bassin : elle influence l'intensité du phénomène, par la pente ;
- la situation amont/aval du sol étudié : mesurée par la "longueur de pente", elle permet de souligner la sensibilité d'un sol situé en aval, soumis à des écoulements plus concentrés et donc plus érosifs ;
- la pédologie : la nature même des sols détermine la sensibilité de ces derniers à l'érosion.

Une fois ces facteurs identifiés, la construction d'un indice de sensibilité du sol à l'érosion est proposée (Pinte, 2006). Différentes méthodes d'agrégation des facteurs existent (l'arborescence logique, l'analyse multicritères, l'expertise). Toutes ont pour objectif de subdiviser le bassin versant en grands ensembles, classés les uns par rapport aux autres selon l'impact environnemental choisi.

Nous avons adapté la méthode de l'arborescence logique (Le Bissonnais, 2002) à notre contexte local. Basée sur les connaissances de terrain et l'expertise scientifique, cette méthode se construit ainsi :

- 1 - Pour chacune des quatre variables précédemment listées, on définit des classes en nombre limité. Par exemple, pour la variable "Occupation du sol", 10 classes représentant la diversité spatiale du bassin sont proposées : habitat diffus, forêt, savane, canne à sucre, maraîchage, banane, etc.
- 2 - On identifie ensuite les combinaisons possibles entre chaque variable. Une combinaison fait donc référence à un jeu de quatre classes (une classe par variable). Ainsi, si 10 classes sont proposées pour chacune des 4 variables retenues, nous obtenons 10^4 possibilités. Ce chiffre est réduit par le nombre prédéfini de classes (2 à 4 classes seulement pour certaines variables) et par l'élimination de combi-

naisons inexistantes (pas d'agriculture sur les sols très pentus, pas de surfaces imperméabilisées sur les crêtes, etc).

3 - Au final, l'arborescence fournit toutes les situations possibles (Figure 1). Le recours à l'expertise et à la connaissance du terrain

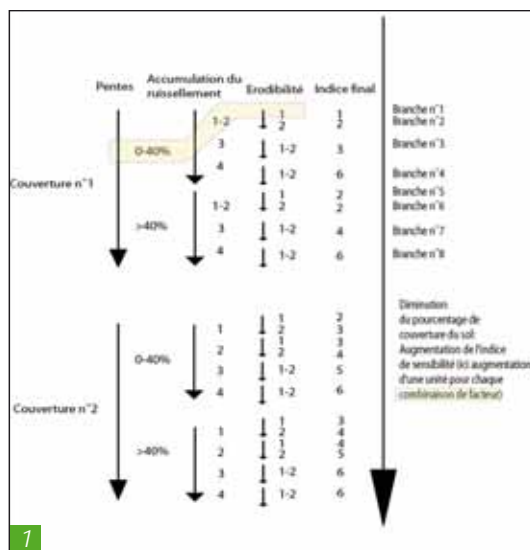


Figure 1 : schématisation de la construction de l'arborescence logique.

permet *in fine* la fusion de ces situations en sept catégories différentes, qui représentent l'indice de sensibilité des sols à l'érosion du bassin versant.

La figure 2 montre le résultat cartographique de cette première analyse. L'indicateur met en évidence deux points essentiels :

- la sensibilité des sols du bassin versant

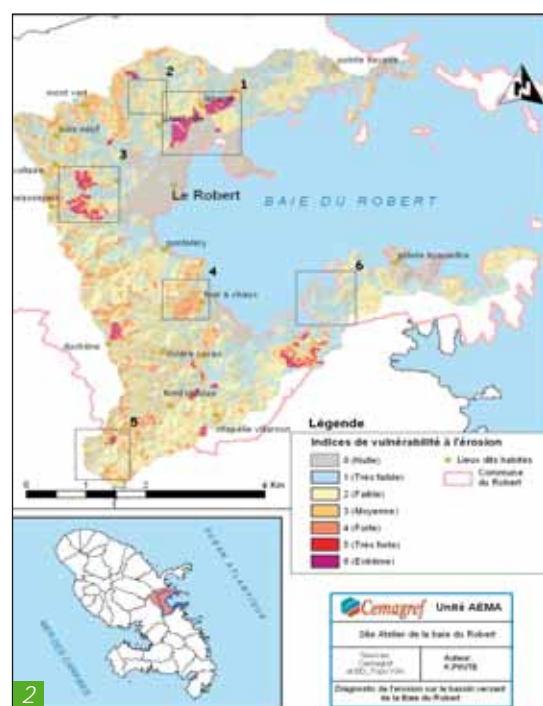


Figure 2 : Vulnérabilité à l'érosion sur le bassin versant et détails.

est ciblée. Seulement 7 % de la superficie totale est classée sensible à très sensible. L'hypothèse qui en découle est la suivante : l'envasement de la baie est la conséquence de processus érosifs intenses mais spatialement limités ;

- les parcelles de banane ainsi que les zones temporaires de travaux constituent les principales occupations considérées sur le bassin comme les plus sensibles.

Cette première partie permet donc de cibler les espaces sur lesquels le diagnostic mérite d'être poursuivi.

La seconde partie présente les suites de ce travail sur un sous bassin versant, celui de la rivière Mansarde (encadré n°3 sur la Figure2).

LA PRÉCISION DE L'ANALYSE SUR LES ZONES IDENTIFIÉES COMME LES PLUS SENSIBLES

Si le modèle développé à l'échelle du bassin versant a permis de localiser les phénomènes érosifs sur des bananeraies notamment, le diagnostic est incomplet.

En effet, en matière d'aide à la décision, deux problématiques restent à étudier :



- 1 - Quelle est l'influence des terres situées en amont des parcelles agricoles sur le déclenchement de l'érosion ?
- 2 - Les terres effectivement érodées sont-elles transportées jusqu'au milieu marin, siège de notre enjeu environnemental ?

Le bassin versant de la rivière Mansarde est considéré par l'indicateur comme une zone très sensible aux phénomènes érosifs.

On constate en effet sur le terrain la présence de bananeraies sur lesquelles des signes d'érosion sont mis en évidence : de larges ravines creusées lors des événements pluvieux traversent les parcelles, des pertes en terre sont repérées par l'existence de micro demoiselles coiffées qui témoignent d'une érosion en nappe conséquente (photos 1 et 2).



*Photo 1 :
ravine dans une
bananeraie.*

*Photo 2 :
Micro demoiselles
coiffées.*

Pour répondre aux deux questions, la réduction de la zone d'étude permet une approche de terrain plus complète.

Le travail mené sur ce sous bassin consiste à représenter les voies d'écoulement superficielles, à la fois émettrices de particules (par ruissellement sur le sol) et vectrices de la pollution.

En identifiant précisément le réseau hydrologique actuel, façonné par la topographie et

certains aménagements anthropiques (ravines, rivières, traces, réseau routier, etc), on est ainsi en mesure d'évaluer non seulement l'origine amont des flux d'eau qui circulent sur les parcelles, mais aussi la possibilité pour les particules solides d'atteindre en aval le milieu marin.

On pourra ainsi faire la différence entre deux parcelles de même sensibilité à l'érosion, l'une étant située aux abords d'un cours d'eau, l'autre au-dessus d'une zone de dépôt.

Du point de vue agricole, elles représentent le même risque, mais du point de vue environnemental, leurs impacts sont nettement différents.

Au final, il ressort les constats suivants :

Les parcelles agricoles, sensibles à l'érosion de leurs sols, reçoivent des écoulements superficiels



des terres amont, concentrés par les aménagements (déviations des eaux pluviales du réseau routier, concentration des flux d'eau domestiques des habitations de crête).

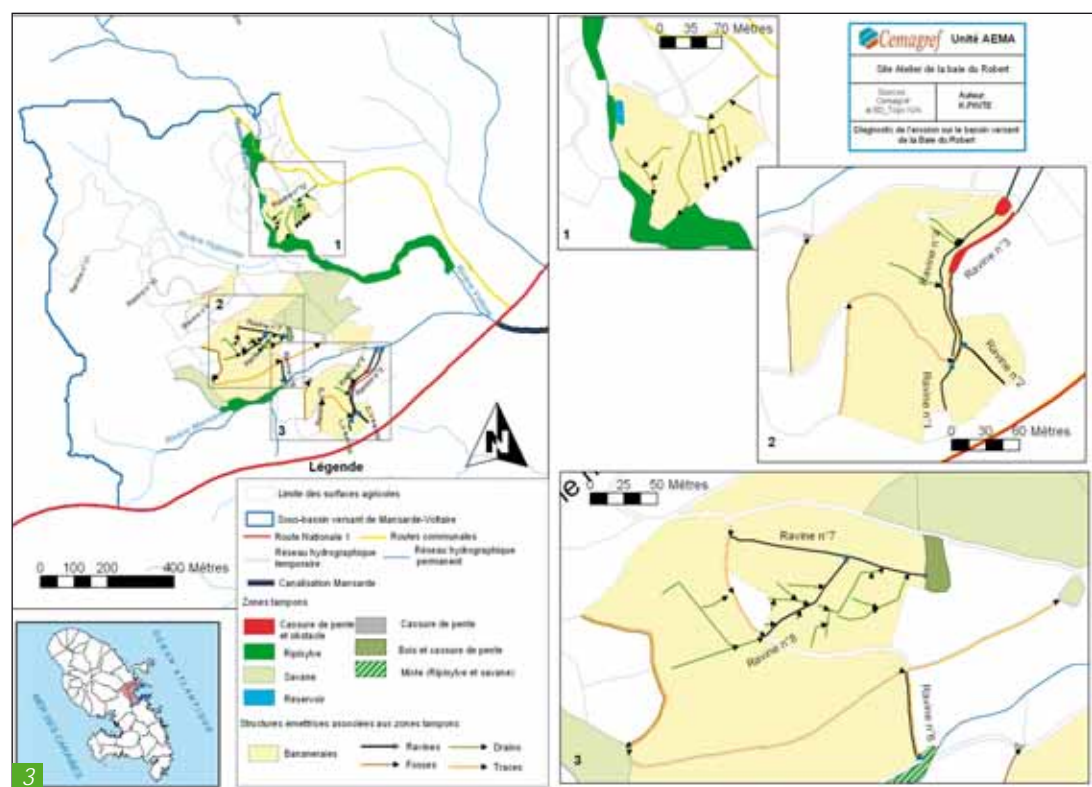
En hivernage, les eaux pluviales alimentent ces flux, permettant la formation de ravines entre les rangs de banane.

En aval, la connexité des parcelles au réseau principal diverge.

Certaines parcelles sont directement connectées, alors que d'autres bénéficient d'une zone tampon (savane, zone enherbée en rupture de pente) qui retient les sédiments (Figure 3).

Néanmoins, compte tenu de l'intensité des pluies sous climat tropical, ces particules sédimentées sont le plus souvent reprises et transportées à nouveau par une crue plus importante, et atteignent in fine l'exutoire côtier.

Figure 3 :
zones tampons
répertoriées et structures
émettrices associées.



CONCLUSION

A l'échelle de territoires à enjeu, qui ne permettent pas une analyse poussée sur l'ensemble du site, l'évaluation des impacts agro-environnementaux s'opère d'abord par une réduction de la zone d'étude. Cibler les zones à risque est une étape transitoire mais essentielle au diagnostic général.

Par la suite, la démarche consiste à développer des méthodes adaptées aux problématiques étudiées. Dans notre cas, si la source de l'enjeu est terrestre, l'impact est marin.

La notion de transport et de spatialisation des activités est donc primordiale et se traduit par l'évaluation de la connexité des parcelles agricoles au réseau hydrologique de surface.

Ce diagnostic territorial doit néanmoins se poursuivre. En effet, il est peu fait allusion à l'aléa climatique (la pluie), condition pourtant sine qua non au déclenchement de l'érosion.

En effet, si l'on reprend deux parcelles identiques en terme de sensibilité à l'érosion et de connexité, il suffira qu'une parcelle soit plus exposée aux pluies intenses que la seconde pour que, à nouveau, leurs impacts environnementaux divergent.

Toutes ces méthodes doivent s'appuyer sur une validation sur le terrain. Une batterie d'hypothèses et de simplifications accompagne en effet indicateurs et modèles, et il est primordial d'insister sur le champ de validité des résultats associés. Dans cet exemple, l'indicateur n'exprime en rien la quantité de terre réellement exportée vers le milieu marin.

Il présente en revanche l'intérêt de pré-flécher les zones sur lesquelles les premières actions auraient avantage à être ciblées (avec par exemple l'utilisation du modèle SIMBA sur les parcelles de banane classées comme très sensibles à l'érosion).

RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

Le Bissonais, Y. et al, (2002). *L'érosion hydrique des sols en France. Rapport IFEN*. 106 p.

Marie, P., Lucas, G. (2005). *Etude spatiale des risques agro-environnementaux. Bassin versant de la baie du Robert. Rapport intermédiaire. MEDD*. 60 p.

Pinte, K., (2006). *Diagnostic de l'érosion sur le bassin versant de la baie du Robert. Rapport de stage. Cemagref/INA P-G*. 184 p.



Houdart M.
PRAM / Cirad.

• *Rendre compte des impacts de l'environnement sur l'agriculture : les apports des systèmes multi-agents*

Pour modifier les systèmes de culture à fort niveau d'intrants (cf article P. Tixier), il est essentiel de comprendre ce qui incite les agriculteurs à les mettre en œuvre. Or, avec la diversification des fonctions assignées aux exploitations agricoles (production, mais aussi environnement, paysage, maintien du tissu social), les choix des exploitants ne dépendent plus seulement des contraintes et atouts de leur exploitation.

Ces choix dépendent désormais plus fortement que par le passé des relations qu'ils entretiennent avec d'autres exploitations ; des orientations politiques prises à l'échelle d'une région pour réguler le foncier par exemple, ou sortir une petite région agricole de son isolement économique ; des réglementations environnementales imposées à l'échelle d'un bassin versant ou en lien avec les distances aux cours d'eau (cf. article de P. Marie).

Se pose alors la question suivante : comment prendre en compte tous ces niveaux d'organisation, pour identifier le déterminisme du choix de systèmes de culture et, à partir de là, sur les pratiques phytosanitaires et l'environnement ?

L'un des objectifs du travail présenté consistait à trouver une méthode à même de rendre compte de l'effet conjugué de déterminants à différentes échelles (parcelle, exploitation, bassin versant, territoire rural) dans l'évolution d'un problème de pollution des eaux par les pesticides.

A été retenue pour cette étude la zone de la rive gauche de la Capot, située dans le Nord de la Martinique et caractérisée par l'enjeu de diminution de pollution des eaux par les pesticides (CIRAD, 2004).

Les analyses spatiales et statistiques permettent d'identifier les déterminants majeurs, directs et indirects des pratiques phytosanitaires. Nous avons souhaité tester la modélisation multi-agents pour simuler l'action conjointe de ces déterminants dans le temps. L'objectif de cet article est de présenter les apports de la simulation multi-agents pour la prise en compte de différentes échelles spatiales dans l'analyse de la relation entre activités agricoles et pollution des eaux par les pesticides.

LE BASSIN VERSANT DE LA CAPOT : DU TRAVAIL DE TERRAIN AUX PREMIÈRES ANALYSES

L'étude menée sur le bassin versant de la rivière Capot (Houdart, 2005) repose sur le traitement d'enquêtes menées auprès de 46 exploitants installés entre Morne Rouge et Ajoupa Bouillon et s'intéresse plus particulièrement aux déterminants des pratiques phytosanitaires des exploitants agricoles.

L'ensemble des données recueillies, concernant les pratiques et leurs déterminants a été intégré dans un Système d'Information Géographique (Houdart, 2004).

Des analyses spatiales et statistiques ont permis d'exprimer la part explicative de plusieurs facteurs dans la variabilité spatiale des pratiques phytosanitaires, exprimées par un indicateur (IcP), calculé à la parcelle.

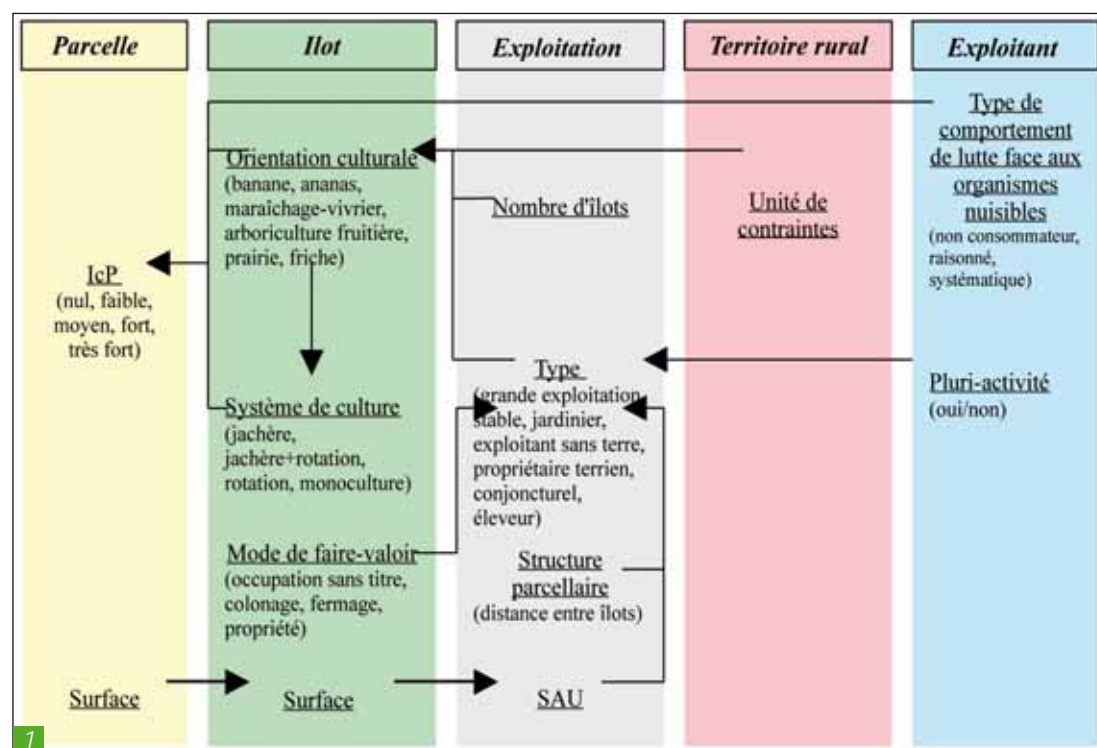
Il est ressorti de ces analyses que la variabilité spatiale et quantitative de l'IcP dépendait, directement ou indirectement (figure 1) :

- au niveau de l'ilot, de l'orientation culturelle, du système de culture, du mode de faire-valoir et de la surface ;
- au niveau de l'exploitation, du nombre d'îlots, du type d'exploitation, de la structure du parcellaire et de la Surface Agricole Utile (SAU) ;
- au niveau de l'ensemble du territoire rural étudié, des unités de contraintes (issues d'un zonage intégrant les contraintes topographiques, topologiques, climatiques, foncières) ;
- des variables propres à chaque exploitant qui entrent également en jeu : comportement de lutte face aux organismes nuisibles et pluri-activité.

C'est sur la base des connaissances que nous avons du fonctionnement du système rural compris entre Morne Rouge et Ajoupa Bouillon, tel que formalisé ci-dessus, que nous avons pu engager l'élaboration d'un système multi-agents.

Figure 1 :
déterminants de l'IcP
à plusieurs échelles
spatiales.

¹ Le logiciel
multi-agents
est disponible
gratuitement sur le site
<http://cormas.cirad.fr>.



LE MODÈLE MULTI-AGENTS ¹

Les systèmes multi-agents (SMA) sont des programmes informatiques qui permettent la simulation de systèmes complexes : ils modélisent des entités artificielles et/ou naturelles qui interagissent pour produire des comportements collectifs. Ils sont constitués d'un ensemble de processus informatiques se déroulant en même temps, donc de plusieurs agents vivant au même moment, partageant des ressources communes et communiquant entre eux. Selon cette définition, l'objectif que nous avons attribué aux SMA était l'appréhension de la capacité d'évolution du territoire rural analysé et les conséquences de cette évolution en terme de distribution de l'IcP. Le modèle a donc été élaboré de façon à prendre en compte la complexité des liens entre acteurs, leurs stratégies et les différentes échelles spatiales.

Les agents, qui peuvent être à la fois des entités spatiales (parcelle, exploitation, bassin versant) et des entités sociales (exploitant, institution), sont reliés entre eux selon des règles d'évolution identifiées au cours des analyses statistiques. Par exemple, lorsque l'agent "exploitant" présente un comportement de lutte face aux organismes nuisibles de type "raisonné" et que l'orientation culturelle de l'agent "îlot" est la banane, l'ananas ou l'arboriculture fruitière, l'IcP de

l'agent "parcelle" est faible dans 83 % des cas, nul dans 15 % des cas et moyen dans 2% des cas.

La structure du modèle repose sur la rasterisation des données SIG. Outre les courbes d'évolution de différentes variables au fil de la simulation, l'une des sorties de la plate forme de simulation est donc une grille spatiale représentant la distribution des cultures en place, ou bien celle des exploitations, ou encore celle de l'IcP, pour chaque pas de temps. La comparaison de ces grilles spatiales avec les courbes d'évolution globale (évolution du nombre d'exploitations de chaque type, évolution de la surface en banane), permet de tirer des conclusions intéressantes et d'engager des pistes de réflexion sur le lien entre les scénarii et la pollution des eaux par les pesticides d'origine agricole.

UN EXEMPLE D'APPLICATION : LE SCÉNARIO "OPÉRATIONNEL"

Compte tenu de l'importance de la structure foncière dans le système rural étudié (surface des entités "parcelle" et "îlot", SAU, mode de faire-valoir, parcellaire de l'exploitation, cf. figure 1), c'est ce déterminant qui a été testé à l'échelle du territoire. Le scénario "opérationnel" fait ainsi évoluer les modes d'accès à la



terre des exploitants en fonction de règles de décision et de processus qui s'expriment à plusieurs échelles :

- la dynamique naturelle de la population d'agriculteurs constitue le moteur du changement : chaque pas de temps de la simulation correspondant à une année, les agents "agriculteurs" vieillissent d'un an à chaque pas de temps. Passé un certain âge, les exploitants partent à la retraite. Le départ à la retraite engendre alors le passage de certains îlots d'une exploitation à l'autre (vente/location).
- la redistribution des îlots (vente/location) s'effectue en fonction de règles à l'échelle de l'exploitation (capacité de l'exploitant à acheter ou louer), mais aussi en fonction de la réglementation foncière en vigueur (schéma départemental des structures).

En raison des règles probabilistes liant les agents spatiaux et sociaux du modèle, dès lors qu'une exploitation agrège un îlot, sa superficie s'en trouve changée, de même que le mode de faire-valoir majoritaire de l'exploitation et l'éclatement des îlots : il en ressort un nouveau type d'exploitation. En conséquence, l'îlot, inclus dans un ensemble stratégique différent, voit ses attributs évoluer. Au final, l'IcP est recalculé.

Au terme des simulations lancées sur 17 pas de temps, on observe deux faits majeurs : une augmentation surfacique des exploitations de

faire-valoir stable (propriété ou fermage) et la généralisation de pratiques raisonnées (principalement due à la venue de jeunes agriculteurs formés et sensibilisés aux questions environnementales).

Ces deux phénomènes cumulés ont pour conséquence une diminution globale des valeurs d'IcP (fig. 2).

Ces évolutions générales sont intéressantes en soi car elles confirment l'hypothèse d'une corrélation entre mutations spatiales (réglementation foncière) et environnement (IcP).

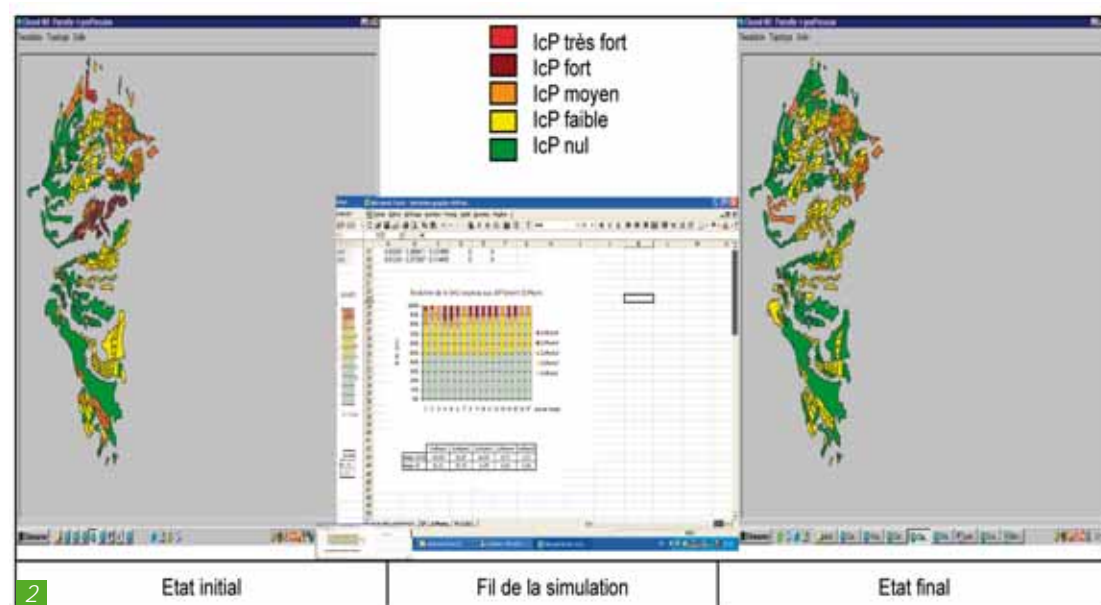
Certes la venue de nouveaux agriculteurs mettant en œuvre des pratiques raisonnées constitue le fait provoquant le plus fortement la baisse de l'IcP (c'est le cas des parcelles en IcP fort au début de la simulation qui passent en IcP faible en fin de simulation).

Cela vient confirmer l'importance de la formation et de la sensibilisation des agriculteurs aux problématiques environnementales.

Cependant, d'autres parcelles, restées aux mains des mêmes exploitants, voient également leur IcP diminuer fortement en raison de l'augmentation surfacique de l'exploitation et du passage en mode de faire-valoir stable de la majorité des îlots (c'est le cas des parcelles en IcP très fort qui passent en IcP nul à moyen en fin de simulation).

Ainsi ces simulations permettent-elles de souligner l'importance de l'aménagement de l'espace à l'échelle d'un territoire rural (rôle du Schéma Directeur Départemental des Structures)

Figure 2.
évolution de la
distribution de l'IcP
au cours de la
simulation.



RÉFÉRENCES BIBLIOGRAPHIQUES

CIRAD (2004). Etude des risques de pollution d'origine agricole en Martinique et Guadeloupe. Le Lamentin, CIRAD, Pôle de Recherche Agronomique de Martinique : 101 + annexes.

Houdart, M. (2005) Organisation spatiale des activités agricoles et pollution des eaux par les pesticides. Modélisation appliquée au bassin-versant de la Capot, Martinique. Doctorat de Géographie, Université des Antilles et de la Guyane.

Houdart, M., Bonin, M., LePage, C., Fort, M., Saudubray, F. (2005). "SIG, Chorèmes et Systèmes Multi-Agents, Evolution d'un système rural martiniquais et pression polluante." Revue Internationale de Géomatique n°15/3: 339-356.

pour la résolution d'un problème environnemental déclenché à l'échelle de la parcelle (IcP).

CONCLUSION

Si les simulations présentées dans cet article n'ont à aucun moment pour objectif de prédire l'avenir de l'agriculture et de la pollution sur la rive gauche de la Capot, elles permettent d'engager une réflexion autour de ce qui est susceptible d'arriver dans un certain contexte et selon certaines conditions. Cette réflexion, accompagnée d'une bonne connaissance du terrain et de la problématique agro-environnementale, peut faire des systèmes multi-agents un outil d'aide à la décision pour les gestionnaires du monde agricole et environnemental.

De surcroît, outre le travail entre chercheurs et gestionnaires, la prise en main d'un tel outil de simulation pousse à réunir des chercheurs de disciplines diverses pour réfléchir à la façon de lier des travaux effectués à des échelles différentes et donc les résultats de recherche variés. Interfacé avec le modèle SIMBA par exemple, cet outil peut permettre de simuler, toujours dans un contexte bien défini, l'évolution des territoires en liaison d'une part avec celle des systèmes de culture et de leur impact sur l'environnement (indicateur R-Pest) et, d'autre part, le rendement des systèmes de culture en fonction de leur âge et de leur localisation. Les recherches en ce sens sont actuellement en cours et font l'objet d'un partenariat avec le CIRAD et l'INRA de Guadeloupe.